新疆天山极端干湿事件时空演变特征

曹丽君[1]， 孙慧兰[1,2]， 兰小丽[1]， 张乐乐[1]， 卢宝宝[1]， 刘天弋[1]

(1. 新疆师范大学地理科学与旅游学院，新疆 乌鲁木齐 830054；
2. 新疆师范大学丝绸之路经济带城市发展中心，新疆 乌鲁木齐 830054)

摘　要：基于新疆天山26个气象站1960—2017年的气象资料，采用FAO Penman-Monteith模型计算了各气象站月地表湿润指数，标准化后统计极端干湿事件频率。运用线性趋势分析法、反距离加权法探究了极端干湿事件频率的时空演变特征，并采用相关分析、偏相关分析及交叉小波分析分别探讨了气象因子和大气环流对极端干湿事件变化的影响。结果表明：(1) 新疆天山极端干、湿事件分别呈减少、增加趋势，年际倾向率分别为-0.40次·$(10a)^{-1}$、0.37次·$(10a)^{-1}$。夏季为天山极端干、湿事件的共同高发季节，也是极端干旱下降趋势最大的季节，而秋季是极端湿润上升趋势最大的季节。(2) 天山北坡是极端干旱事件和极端湿润事件的共同高发区域，极端干、湿事件发生频率高达4.44次·a^{-1}、2.76次·a^{-1}，也是极端干旱下降、极端湿润上升速率最快的区域，平均年际倾向率分别为-0.75次·$(10a)^{-1}$、0.58次·$(10a)^{-1}$。(3) 平均相对湿度是导致该区域极端干湿事件变化的主要气象因子，厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation)是主要大气环流因素。

关键词：天山；极端干湿；时空演变；湿润指数；气象因子；大气环流

IPCC第五次报告指出，全球陆地和海洋表面的平均温度在过去130 a(1880—2012)以0.12 ℃·$(10a)^{-1}$的速率上升[1]。气候变暖使得全球和区域水分循环加速[2]，进而对气候的干湿状况产生重要影响。20世纪下半叶，中国干湿气候波动显著，区域差异较大，体现在华南湿润区趋干，而西北干旱区趋湿[3]。自20世纪80年代后期以来，随着中国西北地区气温和降水的急剧增加[4]，极端气候事件也呈明显增加趋势。其中，极端干湿事件危害性较大，持续时间较长，不但对陆地生态系统功能产生不利影响，而且还加速了许多地区荒漠化和土地退化进程并对粮食安全造成冲击[5-6]。因此，深入研究并揭示极端干湿事件的时空演变规律，有助于我们增强对极端干湿事件的了解，对其产生的负面影响采取积极应对措施，减少灾害造成的损失。

近年来，许多学者针对气候变暖背景下中国西北地区和新疆降水及干湿状况等开展了相关研究，并取得了重要成果。黄小燕等[7]研究发现，西北五省年降水量变化倾向率表现出微弱的上升趋势。刘维成等[8]研究发现，西北地区中西部年降水量不断增加，而西北地区东部年降水量有减少的倾向。张永等[9]研究发现，西北地区西部有变湿的趋势，西北地区东部逐渐变干，特别是夏秋季，西北地区东南部变干的趋势更加明显。慈晖等[10]研究发现，平均降水过程和极端降水过程均能反映新疆明显的湿润化趋势。谢培等[11]研究发现新疆降水量、降雨日整体呈上升趋势，而干旱相关指标总体呈现下降趋势。总结前人的研究发现，研究区域多以整个西北或新疆区域为尺度，缺少局部区域的深入探讨，且研究对象主要以降水和一般干湿变化为主，而针对具有潜在破坏性的极端干湿事件关注较少，对其局域性发生发展规律研究还不够充分。

新疆天山及其两侧地带，是暖干向暖湿转型的显著区域[12]，对气候变化比较敏感，对该区域的极端干湿事件进行研究有助于更全面地认识中国气候干湿变化及其影响的区域差异。新疆天山是新疆乃至整个西北干旱区气候和生态环境的重要天然屏障[13]，是新疆主要的水源地，南北坡又是新疆

收稿日期：2020-06-22； **修订日期：**2020-07-21
基金项目：国家自然科学基金项目(41761004)；新疆师范大学丝绸之路经济带城市发展研究中心开放课(XJNURWJD062017B02)
作者简介：曹丽君(1994-)，女，硕士研究生，主要研究方向为自然资源开发与规划. E-mail: 1429681889@qq.com
通讯作者：孙慧兰. E-mail: hlsunxjnu@sina.com

重要的粮食产区[14],该区域气候变化不仅对新疆的生态环境、自然资源和粮食安全起着重要作用,而且对我国中、西部地区的气候与环境也产生深远的影响。鉴于此,本文以标准化的地表湿润指数来计算新疆天山极端干湿事件,采用线性趋势分析法、反距离加权法、相关性分析、偏相关性分析及交叉小波分析探讨其时空演变特征和影响因素,以期发现该区域极端气候演变规律,并为我国干旱区的长期干湿气候预测、生态环境保护和防灾减灾工作提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

天山是世界七大山系之一,是世界上距离海洋最远的山系,也是全球温带干旱地区最大的山系。本文所指中国境内的天山山脉(38.85~45.42°N,73.79~96.41°E)位于天山山系的东部,约占该山系总长度的2/3,呈东西走向横亘于新疆中部[15]。该区域降水分布极不均匀,年降水具有"西多东少,北多南少,高山多外围少"的特征[16]。依据研究区的地理位置并参考前人研究(图1),将海拔在1500 m以上的区域划分为天山山区,依天山主山脊为界分为南坡和北坡[17]。

1.2 数据来源与处理

选取天山区域26个气象站点1960—2017年的逐日气象数据,包括降水量、平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、相对湿度、平均风速,并对缺测数据进行插补,另外,为了避免检测到因站点迁移等人为原因而导致的数据不均一的问题,在趋势分析前,通过RHtest方法对数据进行了均一化处理。逐日气象数据来源于中国国家气象数据网(https://data.cma.cn/)。

采用1960—2017年的大西洋多年涛动(AMO)、太平洋十年涛动(PDO)、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和北大西洋涛动(NAO)的月度数据分析大气环流对极端干湿事件的影响。PDO数据从东京气候中心(http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/elnino/decadal/pdo.html)获取;AMO数据来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)地球系统研究实验室(http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.long.data);ENSO数据来源于NOAA地球系统研究实验室(http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/nina34.data);NAO数据来自NOAA国家气候数据中心(http://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao.php)。

1.3 研究方法

1.3.1 极端干湿事件 本文采用地表湿润指数评价气候干湿状况,计算方法为降水量与潜在蒸散之比,如公式(1)所示:

$$H = \frac{P}{ET_0} \tag{1}$$

式中:H为月湿润指数(年湿润指数);P为月降水量(年降水量);ET_0为月潜在蒸散(年潜在蒸散)。

潜在蒸散量(ET_0)通过世界粮农组织(FAO)推荐1998年修正后的Penman-Monteith模型计算,公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T+273)} U_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \tag{2}$$

式中:Δ为饱和水气压曲线斜率(kPa·℃$^{-1}$);R_n为净辐

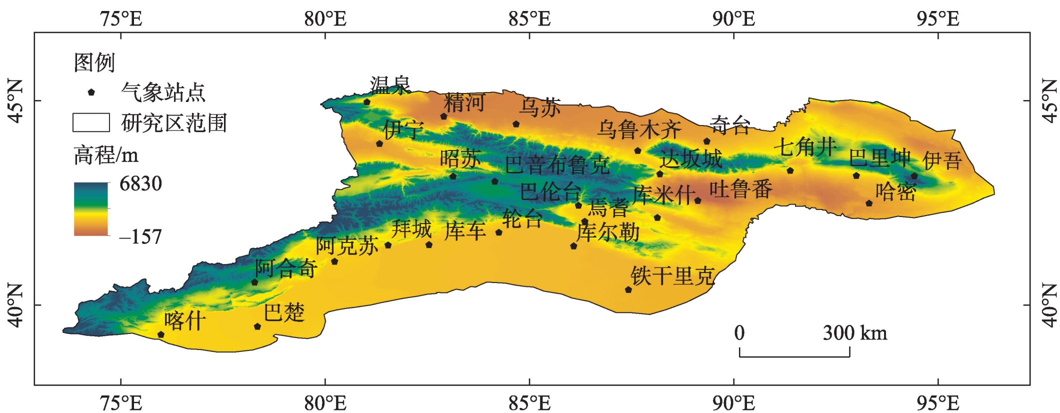


图1 研究区地形和气象站点分布

Fig. 1 The distribution of topographic and meteorological stations in the study area

射(MJ·m^{-2}·d^{-1});G为土壤热通量(MJ·m^{-2}·d^{-1}),在逐日估算时G=0;γ为干湿表常数(kPa·℃$^{-1}$);T为2 m高处的日平均气温(℃);U_2为2 m高处的平均风速(m·s^{-1});e_s为饱和水汽压(kPa);e_a为实际水汽压(kPa)。

Penman-Monteith模型中净辐射(R_n)、饱和水气压曲线斜率(Δ)及饱和水气压(e_s)和实际水气压(e_a)参数气象站无法获取,主要是通过以下公式[18-19],利用已知数据计算求得。

(1) 净辐射(R_n):

$$R_n=(1-\rho)R_oR_p-\lambda\left(\frac{T^4_{\max,k}+T^4_{\min,k}}{2}\right)\left(0.34-0.14\sqrt{e_a}\right)\left(1.35\frac{R_o}{R_q}-0.35\right) \tag{3}$$

$$R_o=\left(a+b\frac{n}{N}\right)R_p \tag{4}$$

$$R_q=(a+b)R_p \tag{5}$$

$$R_p=\frac{12(60)}{\pi}G_{sc}d_r\left[\omega\sin(\varphi)\sin(\delta)+\cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(\omega)\right] \tag{6}$$

式中:ρ为地表反射率,取值0.23;R_o为接收的太阳辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});R_p为大气顶层的太阳辐射(MJ·m^{-2}·d^{-1});R_q为晴空辐射;$T_{\max,k}$为最高绝对气温温标(K);$T_{\min,k}$为最低绝对气温温标(K);N为最大可能日照时数(h);n为实际日照时数(h);λ为波尔兹曼常数(4.903×10^{-9} MJ·K^{-4}·m^{-2}·d^{-1});G_{sc}为太阳常数,取值0.082;d_r为反向日地相对距离;ω为日落时角;φ为纬度;δ为太阳赤纬;a和b为辐射项系数区,在西北地区取值分别为0.281和0.441。

(2) 饱和水汽压曲线斜率(Δ):

$$\Delta=\frac{4098\left[0.61\exp\left(\frac{17.27T}{T+237.30}\right)\right]}{(T+237.30)^2} \tag{7}$$

(3) 饱和水汽压(e_s)和实际水气压(e_a):

$$e_s=0.31\times\left[\exp\left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max}+237.30}\right)\right]+\exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min}+237.30}\right) \tag{8}$$

$$e_a=RHe_s \tag{9}$$

式中:RH为相对湿度;$T_{\max}$为日最高气温(℃);$T_{\min}$为日最低气温(℃)

根据月湿润指数标准化变量的大小定义极端干、湿事件。当H的标准化变量≤-0.5时为极端干旱月,当H的标准化变量≥0.5时为极端湿润月[20]。采用以下公式计算月湿润指数标准化变量:

$$D_{H_{ij}}=\frac{H_{ij}-\overline{H_i}}{\sigma_i} \tag{10}$$

式中:$D_{H_{ij}}$为第j年第i月湿润指数的标准化变量;H_{ij}为第j年第i月湿润指数;$\overline{H_i}$为i月多年平均值;σ_i为第i月湿润指数的标准差。

1.3.2 相关性 当两个或多个变量具有相关关系,分析两个变量之间的相关性称为简单相关分析。在多变量的情况下,变量之间的相关关系比较复杂,可以采用偏相关分析,即在对其他变量的影响进行控制的条件下,衡量多个变量中某两个变量之间的线性相关程度。本文将这两种方法结合使用,探究不同气象因子对湿润指数的影响。

1.3.3 交叉小波变换 交叉小波变换是一种揭示两个时间序列之间相关性的新方法。交叉小波变换分析结合交叉谱分析与小波变换2种方法,能够发挥小波变换在时频两域都具有表征气候信号局部化特征的作用,用于分析区域气候变化与大气环流之间相关性具有显著的优越性,详细的计算过程参考了孙卫国等[21]和Torrence等[22]的相关研究。

2 结果分析

2.1 新疆天山极端干湿事件时间演变特征

2.1.1 极端干湿事件频率变化趋势 1960—2017年,新疆天山极端干旱事件频率呈现显著的下降趋势(图2a),其年际倾向率为-0.40次·(10a)$^{-1}$,通过0.01水平的显著性检验。过去58 a极端干旱事件频率为3.67次,其中,极端干旱事件频率大于平均值的年份有32 a,占总年份的55%,1968年出现极大值(5.65次),1998年出现极小值(1.81次)。天山极端湿润事件频率以0.37次·(10a)$^{-1}$的速率呈显著的上升趋势(图2b),通过0.01水平的显著性检验。极端湿润事件频率为2.30次,极端湿润事件频率大于平均值的年份有28 a,占总年份的48%,极大值出现在1998年(4.54次),极小值出现在1968年(0.62次)。

2.1.2 极端干湿事件频率季节变化趋势 季节划分采用气象季节,春季(3—5月),夏季(6—8月),秋季(9—11月),冬季(12月至翌年2月)。由图3可知,天山各季节极端干旱事件均表现为减少趋势,除春季仅通过0.05水平显著性检验外,其他季节都通过了0.01水平显著性检验,其中以夏季减少趋势最明

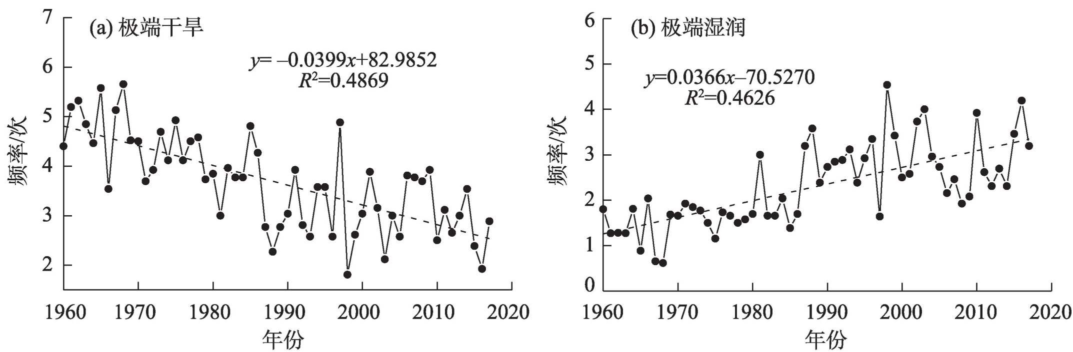


图2 天山极端干湿事件频率变化趋势

Fig. 2 Frequency variation trend of extreme dry and wet events in Tianshan Mountains

显,年际倾向率为−0.12次·(10a)$^{-1}$;而不同季节极端湿润事件均表现为增加趋势,且通过0.01水平显著性检验,其中以秋季增加趋势最明显,年际倾向率为0.11次·(10a)$^{-1}$。极端干、湿事件的季节平均频率表现为夏季最多(极端干旱事件1.13次·a^{-1},极端湿润事件0.68次·a^{-1}),冬季最少(极端干旱事件0.75次·a^{-1},极端湿润事件0.47次·a^{-1}),且各季节极端干旱事件频率均大于极端湿润事件频率。综上所述,夏季为天山极端干、湿事件的共同高发季节,也是极端干旱事件频率下降趋势最大的季节,而秋季是极端湿润事件频率上升趋势最大的季节。

2.2 新疆天山极端干湿事件的空间演变特征

2.2.1 不同区域极端干湿事件频率的年代际变化 由表1可知,总体上1960—2017年极端干、湿事件发生平均频率天山北坡 > 天山山区 > 天山南坡。不同年代来看,极端干旱事件发生频率:天山山区呈连续减少趋势,而天山北坡仅在2000s略有增加外,整体呈减少趋势,天山南坡则呈"减—增—减"趋势,并在1990s取得最小值2.75次·a^{-1};极端湿润事件频率:天山北坡和天山山区除在2000s略有减少外整体呈增加趋势,天山南坡呈"增—减"趋势,并在1990s取得最大值2.49次·a^{-1}。综上,天山北坡是极端干旱事件和极端湿润事件的共同高发区域,极端干、湿事件频率分别为4.36次·a^{-1}、2.76次·a^{-1}。1960s为天山极端干旱事件的高发期,2000—2017年为天山北坡和天山山区极端湿润事件的高发期,1990s为天山南坡极端湿润事件的高发期。

2.2.2 极端干湿事件变化趋势空间分布 天山除七角井外其余站点极端干旱年际倾向率均呈减少趋势(图4a),且减少速率由北向南递减,天山北坡多数站点减少速率较大,平均年际倾向率为−0.75次·(10a)$^{-1}$。天山极端湿润事件除七角井外均呈增加趋势(图4b),且增加速率也是由北向南递减,速率较大的站点主要分布在天山北坡,平均速率为0.58次·(10a)$^{-1}$。分析可知,新疆天山绝大部分地区极端干旱减少都与极端湿润的增多相对应,天山北坡既是极端干旱减少速率最大的区域又是极端湿润增加速率最大的区域。

2.3 气象因子和大气环流与天山极端干湿事件的关系

2.3.1 不同气象因子与湿润指数的相关性 由湿润指数的计算公式可知,其变化主要受降水量和潜在蒸散量的影响,而用于计算蒸散量的主要有6个气象因子(平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均风速、相对湿度),为了更清晰的反映这6个因子对湿润指数的影响,本文分别采用相关系数和偏相关系数,以探讨不同气象因子与湿润指数的相关性。从表2相关系数可知,平均气温、最高气温、日照时数和平均风速都与湿润指数呈极显著负相关(P<0.01),最低气温与湿润指数呈显著负相关(P<0.05);而平均相对湿度与湿润指数呈极显著正相关(P<0.01)。不同气象因子对湿润指数影响大小用相关性大小表征:平均相对湿度>日照时数>平均风速>最高气温>平均气温>最低气温。从偏相关系数来看,只有平均相对湿度与湿润指数呈极显著正相关,且相关性最大。相关分析和偏相关分析都反映了极端干湿事件除降水外主要受平均相对湿度控制。

2.3.2 大气环流对湿润指数的影响 由图5a可知,年湿润指数H与ENSO在1985—1999年有2~6 a周

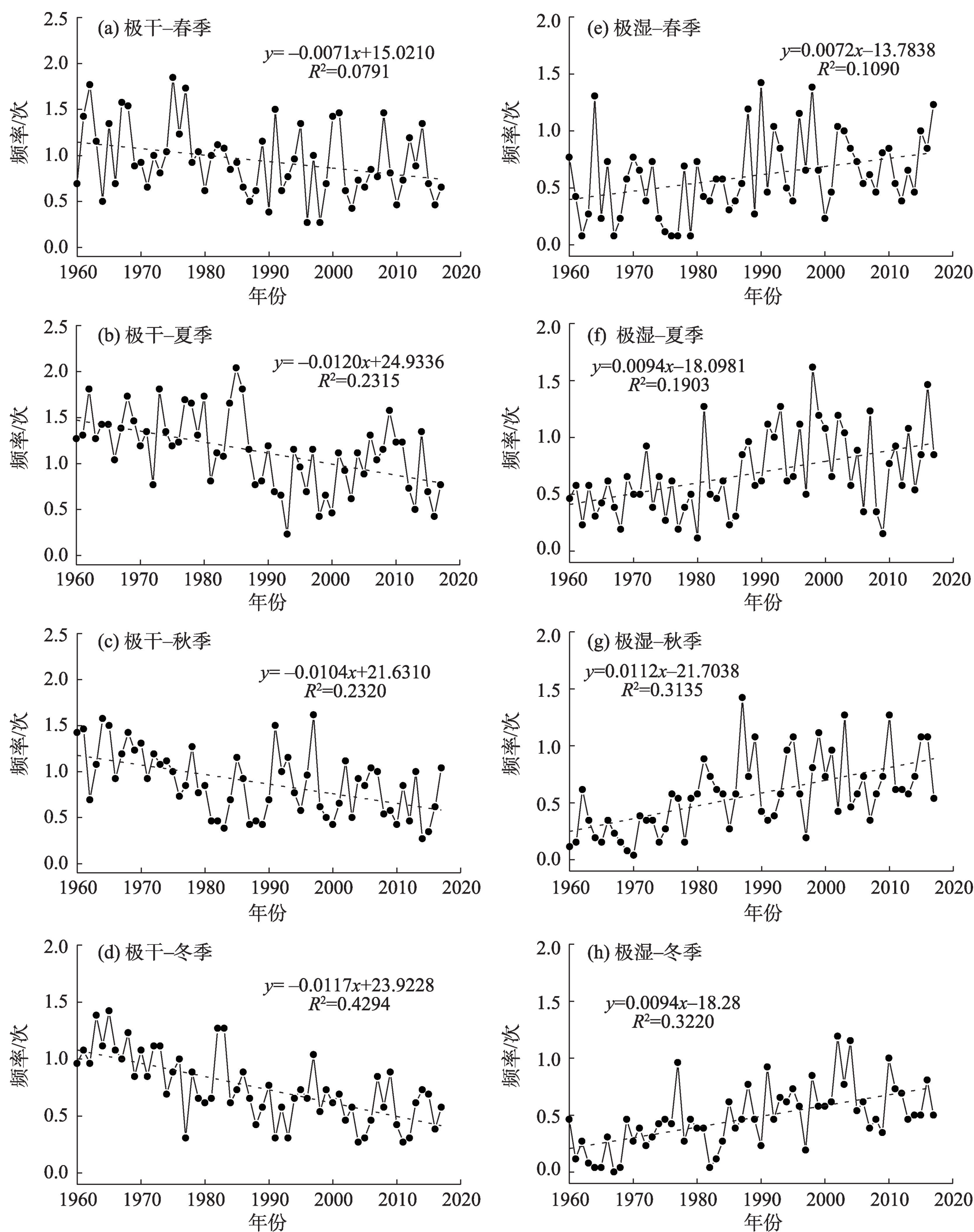


图3 天山不同季节极端干湿事件频率变化趋势

Fig. 3 Variation trend of extreme dry and wet events in different seasons in Tianshan Mountains

表1 天山不同区域年代极端干湿事件频率

Tab. 1 Frequency of extreme dry and wet events in different regions in Tianshan Mountains in different years /(次·a^{-1})

年代	天山北坡		天山南坡		天山山区	
	极端干旱	极端湿润	极端干旱	极端湿润	极端干旱	极端湿润
1960s	6.57	1.36	3.78	1.18	5.02	1.63
1970s	5.66	1.50	3.45	1.60	4.45	1.85
1980s	4.30	2.79	2.98	1.82	3.78	2.47
1990s	3.47	3.67	2.75	2.49	3.55	3.27
2000s	3.64	3.14	3.03	2.25	3.47	3.20
2010—2017年	2.66	4.25	2.77	2.13	2.81	3.81
1960—2017年	4.44	2.73	3.14	1.90	3.88	2.67

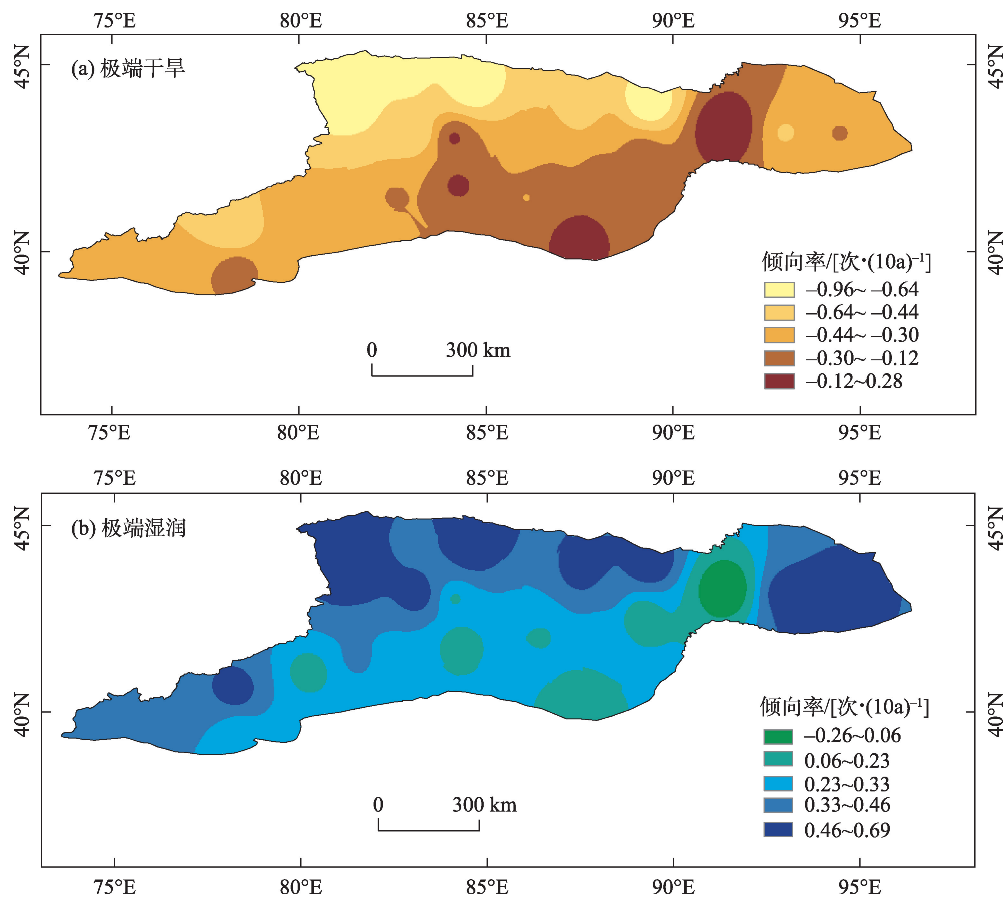


图4　1960—2017年天山极端干湿事件年际倾向率空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of interannual inclinations of extreme dry and wet events in Tianshan Mountains from 1960 to 2017

表2　天山湿润指数与各气象因子之间的相关性

Tab. 2　Correlation between humid index and different meteorological factors in Tianshan Mountains

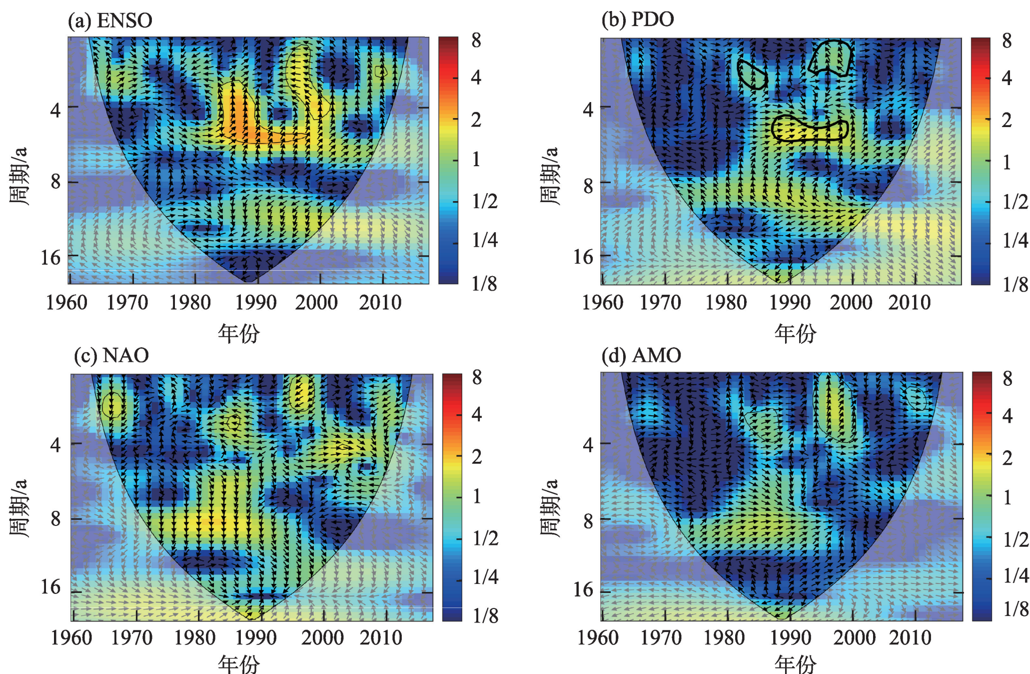
系数	平均气温	最高气温	最低气温	日照时数	平均风速	平均相对湿度
相关系数	−0.023**	−0.025**	−0.019*	−0.034**	−0.026**	0.056**
偏相关系数	0	−0.007	0.007	0	−0.006	0.041**

注:**表示在0.01水平(双侧)上极显著相关,*表示在0.05水平(双侧)上显著相关。

期的显著正相关关系,在1995—2002年有1~5 a周期的显著负相关关系。*H*与PDO在1982—1986年2~3 a周期的显著正相关关系(图5b);在1888—1999有5~6 a周期的显著正相关关系,1993—2000年1~2 a周期的显著负相关关系。*H*与NAO相关性相对较小(图5c)。*H*与AMO在1982—1988年有周期为2~4 a显著正相关;在1998—2000年有1~4 a周期的显著正相关(图5d)。总体而言,ENSO、PDO、NAO和AMO对年地表湿润指数都有一定的影响,其中对年地表湿润指数影响最强的是ENSO,而最弱的是NAO。

3　讨 论

1960—2017年天山极端干旱事件频率呈现显著的下降趋势,极端湿润事件呈显著上升趋势,年际倾向率分别为−0.40次·(10a)$^{-1}$、0.37次·(10a)$^{-1}$。就变化趋势而言,本研究结果与前人对我国北方地区的极端干湿事件变化的总体趋势是一致的[23~26]。从变化速率来看,存在较大的区域差异性,即本研究区与极端干湿事件的变化速率相比我国北方其他地区较快。这可能是因为,近些年新疆伴随着降水



注：图中黑色细线椎体为有效谱值区，区内黑色粗线表示显著性水平为0.05的置信区间。箭头表示相位差，→表示两时间序列变化相位一致，←表示两时间序列变化相位相反，↑表示*H*落后影响因子变化3个月，↓表示*H*比影响因子变化提前3个月。

图5 1960—2017年天山年地表湿润指数与ENSO、PDO、NAO及AMO的交叉小波凝聚谱图

Fig. 5 Cross-wavelet condensation spectra of surface humid index and ENSO, PDO, NAO and AMO in Tianshan Mountains from 1960 to 2017

量的增加，降水强度和降水频率也均增大[10]，且风速和日照时数都呈减少趋势[27-28]，相应地引起湿润指数增加；加之天山山区冰川和积雪加速消融，使得新疆天山暖湿化进程加快的同时不稳定性加剧。

新疆天山极端干湿事件夏季发生频率最多而冬季最少，极端干旱在夏季下降趋势最大而极端湿润在秋季上升趋势最大。这与黄静等[29]和王妮等[30]学者对新疆干旱和暴雨洪涝灾害的研究结果一致。王文静等[31]通过分析综合气象干旱指数发现雨涝严重程度北疆大于南疆，而干旱严重程度南北差异不大。而本研究结果显示天山北坡是极端干、湿事件的共同高发区，虽然新疆长期降水存在“北多南少”的规律，但是由于北疆潜在蒸散大于南疆[32]，从而导致天山北坡极端干旱发生。虽然新疆天山极端干旱事件呈下降趋势，但由于远离海洋水汽源，难以从空中补充本地水汽，目前该区域干旱情况仍然不容忽视，且天山北坡极端湿润事件的快速增多也极易导致洪水灾害频发，已有研究表明近些年新疆粮食生产波动更易受自然灾害影响[33]，且80年代以后新疆洪水灾害成灾面积急剧增多[34]，相关部门需加以重视。

干湿变化受多方面的因素影响，普遍认为是气象要素变化影响了气候干湿变化，但根本上来说，大气环流是更为直接的原因[26]。本研究结果表明，气象因素方面，湿润指数与气温、日照、风速呈负相关，与相对湿度呈正相关，平均相对湿度是影响湿润指数的最主要气象因子，该结果与罗青红等[35]对新疆甘家湖地表干湿状况变化的研究结果一致。大气环流方面，ENSO对该区域湿润指数影响最强，Li等[23]研究发现对渭河流域同样受ENSO的影响最强，这说明在西北干旱区ENSO对湿润指数具有一致的强影响性。本研究仅定性分析了这两种因素对干湿气候的影响，而其对干湿气候影响的定量分析有待进一步深入研究。

4 结 论

（1）1960—2017年天山极端干旱事件频率呈现显著的下降趋势，极端湿润事件呈显著上升趋势，年际倾向率分别为−0.40次·$(10a)^{-1}$、0.37次·$(10a)^{-1}$。夏季为天山极端干、湿事件的共同高发季节（极端干旱事件1.13次·a^{-1}，极端湿润事件0.68次·a^{-1}），也

是极端干旱事件频率下降趋势最大的季节,频率为-0.12次·$(10a)^{-1}$,而秋季是极端湿润事件频率上升趋势最大的季节,频率为0.11次·$(10a)^{-1}$。

(2)天山北坡是极端干、湿事件的共同高发区域,极端干、湿事件频率分别为4.44次·a^{-1}、2.73次·a^{-1}。1960s为天山极端干旱事件的高发期,2010—2017年为天山北坡和天山山区极端湿润事件的高发期,1990s为天山南坡极端湿润事件的高发期。天山北坡极端干旱下降、极端湿润上升速率最快的区域,平均年际倾向率分别为-0.75次·$(10a)^{-1}$、0.58次·$(10a)^{-1}$。

(3)极端干湿事件的变化受多种因素影响。气象因素方面,平均相对湿度是影响天山极端干湿事件变化的最主要因子。大气环流方面,对年地表湿润指数影响最强的是ENSO,而最弱的是NAO。

参考文献(References):

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis by IPCC Working Group I[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1535

[2] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring?[J]. Science, 2007, 317(5835): 233-235.

[3] Zhang Q, Singh V P, Li J F, et al. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116(23): D23106.

[4] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68-76. [Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 68-76.]

[5] 黄萌田, 周佰铨, 翟盘茂. 极端天气气候事件变化对荒漠化、土地退化和粮食安全的影响[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 17-27. [Huang Mengtian, Zhou Baiquan, Zhai Panmao. Impacts of extreme weather and climate events on desertification, land degradation and food security[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1): 17-27.]

[6] 许吟隆, 赵运成, 翟盘茂. IPCC特别报告SRCCL关于气候变化与粮食安全的新认知与启示[J]. 气候变化研究进展, 2020, 16(1): 37-49. [Xu Yinlong, Zhao Yuncheng, Zhai Panmao. Advances in scientific understanding on climate change and food security from IPCC special report SRCCL[J]. Climate Change Research, 2020, 16(1): 37-49.]

[7] 黄小燕, 李耀辉, 冯建英, 等. 中国西北地区降水量及极端干旱气候变化特征[J]. 生态学报, 2015, 35(5):1359-1370. [Huang Xiaoyan, Li Yaohui, Feng Jianying, et al. Climate characteristics of precipitation and extreme drought events in Northwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(5): 1359-1370.]

[8] 刘维成, 张强, 傅朝. 近55年来中国西北地区降水变化特征及影响因素分析[J]. 高原气象, 2017, 36(6): 1533-1545. [Liu Weicheng, Zhang Qiang, Fu Zhao. Variation characteristics of precipitation and it's affecting factors in Northwest China over the past 55 Years[J]. Plateau Meteorology, 2017, 36(6): 1533-1545.]

[9] 张永, 陈发虎, 勾晓华, 等. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布——基于PDSI数据[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1142-1152. [Zhang Yong, Chen Fahu, Gou Xiaohua, et al. The temporal and spatial distribution of seasonal dry-wet changes over the northwestern China: Based on PDSI[J]. Journal of Geographical Sciences, 2007, 62(11): 1142-1152.]

[10] 慈晖, 张强, 张江辉, 等. 1961—2010年新疆极端降水过程时空特征[J]. 地理研究, 2014, 33(10): 1881-1891. [Ci Hui, Zhang Qiang, Zhang Jianghui, et al. Spatiotemporal variations of extreme precipitation events within Xinjiang during 1961-2010[J]. Geographical Research, 2014, 33(10): 1881-1891.]

[11] 谢培, 顾艳玲, 张玉虎, 等. 1961—2015年新疆降水及干旱特征分析[J]. 干旱区地理, 2017, 40(2): 332-339. [Xie Pei, Gu Yanling, Zhang Yuhu, et al. Precipitation and drought characteristics in Xinjiang during 1961-2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(2): 332-339.]

[12] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. [Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warn dry to warm wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164.]

[13] 陈迪桃, 黄法融, 李倩, 等. 1966—2015年天山南北坡空气湿度差异及其影响因素[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(6): 562-572. [Chen Ditao, Huang Farong, Li Qian, et al. Spatial variation of humidity and its influencing factors in the north and south slopes of the Tianshan Mountains, China during 1966-2015[J]. Climate Change Research, 2018, 14(6): 562-572.]

[14] 王晶, 肖海峰. 2000—2015年新疆粮食生产时空演替与驱动因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(2): 58-66. [Wang Jing, Xiao Haifeng. The spatial-temporal pattern changes and driving factors of grain production in Xinjiang province[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2018, 39(2): 58-66.]

[15] 程新宇杰, 高路. 基于综合自然区划的天山区域气温变化研究[J]. 山地学报, 2018, 36(2): 194-205. [Cheng Xinyujie, Gao Lu. Temperature changes in Tianshan Mountains based on integrated physicogeographical regionalization[J]. Mountain Research, 2018, 36(2): 194-205.]

[16] 刘友存, 焦克勤, 赵奎, 等. 中国天山地区降水对全球气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2017, 39(4): 748-759. [Liu Youcun, Jiao Keqin, Zhao Kui, et al. The response of precipitation to global climate change in the Tianshan Mountains, China[J]. Journal of Gla-

ciology and Geocryology, 2017, 39(4): 748-759.]
[17] 丁之勇, 董义阳, 鲁瑞洁. 1960—2015年中国天山南、北坡与山区极端气温时空变化特征[J]. 地理科学, 2018, 38(8): 1379-1390. [Ding Zhiyong, Dong Yiyang, Lu Ruijie. Spatio-temporal variability of temperature extremes in Tianshan Mountains area, Northwest China, during 1960-2015[J]. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(8): 1379-1390.]
[18] 钟巧, 焦黎, 李稚, 等. 博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(1): 103-112. [Zhong Qiao, Jiao Li, Li Zhi, et al. Spatial and temporal changes of potential evapotranspiration and its attribution in the Bosten Lake Basin[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1): 103-112.]
[19] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报, 1982(2): 196-206. [Zhu Changhan. A further discussion on the climatological calculating method of total radiation[J]. Journal of Nanjing Meteorology, 1982(2): 196-206.]
[20] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 69-74. [Ma Zhuguo, Hua Lijuan, Ren Xiaobo. The extreme dry/wet events in northern China during recent 100 years[J]. Journal of Geographical Sciences, 2003, 58(Suppl.): 69-74.]
[21] 孙卫国, 程炳岩. 交叉小波变换在区域气候分析中的应用[J]. 应用气象学报, 2008, 19(4): 479-487. [Sun Weiguo, Cheng Bingyan. Application of Cross Wavelet Transformation to analysis on regional climate variations[J]. Journal of Applied Meterological Science, 2008, 19(4): 479-487]
[22] Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1): 1-78.
[23] Li Y, Huang S Z, Ma L, et al. Spatiotemporal changes in extreme wet and dry conditions and linkages with planetary oscillations[J]. Journal of Coastal Research, 2018, 84(Suppl.):134-143.
[24] 曹立国, 潘少明, 贾培宏, 等. 1960—2009年河西地区极端干湿事件的演变特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 480-489. [Cao Liguo, Pan Shaoming, Jia Peihong, et al. Temporal and spatial characteristics of the extreme drought and wet events changes in Hexi Area from 1960 to 2009[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(3): 480-489.]
[25] 吴燕锋, 巴特尔·巴克, 魏小琴, 等. 阿勒泰地区极端干湿事件的时空变化特征[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 138-147. [Wu Yanfeng, Bake Batur, Wei Xiaoqin, et al. Spatiotemporal change characteristics of extreme wet and dry events in Altay[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(4): 138-147.]
[26] 贾艳青, 张勃. 1960-2016年中国北方地区极端干湿事件演变特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1543-1554. [Jia Yanqing, Zhang Bo. Spatio-temporal changes of the extreme drought and wet events in Northern China from 1960 to 2016[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1543-1554.]
[27] 张明军, 李瑞雪, 黄小燕, 等. 中国天山山区风速变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(7): 78-83. [Zhang Mingjun, Li Ruixue, Huang Xiaoyan, et al. Changes of wind speed in Tianshan Mountains[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2012, 26(7): 78-83.]
[28] 辛宏, 张明军, 李瑞雪, 等. 近50年中国天山日照时数变化及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2011, 28(3): 485-491. [Xin Hong, Zhang Mingjun, Li Ruixue, et al. Analysis on the change of sunshine duration and its affecting factors in the Tianshan Mountains in recent 50 years[J]. Arid Zone Research, 2011, 28(3): 485-491.]
[29] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近17年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1077-1088. [Huang Jing, Zhang Yun, Wang Mingxiu, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 1077-1088.]
[30] 王妮, 崔彩霞, 刘艳. 新疆暴雨洪涝灾害损失的时空特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 325-330. [Wang Ni, Cui Caixia, Liu Yan. Temporal-spatial characteristics and influencing factors of rainstorm-flood disasters in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 325-330.]
[31] 王文静, 延军平, 刘永林. 新疆旱涝气候的南北差异性分析[J]. 干旱区研究, 2016, 33(3):609-618. [Wang Wenjing, Yan Junping, Liu Yonglin. Difference of drought/flood disasters in Xinjiang[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 609-618.]
[32] 阿迪来·乌甫, 玉素甫江·如素力, 热伊莱·卡得尔, 等. 基于MODIS数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J]. 地理研究, 2017, 36(7): 1245-1256. [Adilai Wufu, Yusufujiang Rusuli, Reyilai Kadeer, et al. Spatio-temporal distribution and evolution trend of evapotranspiration in Xinjiang based on MOD16 data[J]. Geographical Research, 2017, 36(7): 1245-1256.]
[33] 李福夺, 杨兴洪. 新疆粮食生产波动——波动特征与影响因素[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(8): 54-61. [Li Fuduo, Yang Xinghong. The food production fluctuation in Xinjiang: Fluctuation characteristics, influence factors and policy recommendations[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(8): 54-61.]
[34] 向明燕, 范丽红, 海米提·依米提, 等. 新疆近45年气象灾害及其防御措施[J]. 干旱区研究, 2007, 24(5): 712-716. [Xiang Mingyan, Fan Lihong, Haimit Yimiti, et al. Study on the change of meteorological disasters and the prevention measures in Xinjiang since recent 45 years[J]. Arid Zone Research, 2007, 24(5): 712-716.]
[35] 罗青红, 宁虎森, 陈启民. 基于湿润指数的新疆甘家湖地表干湿状况变化趋势[J]. 干旱区研究, 2016, 33(5): 921-926. [Luo Qinghong, Ning Husen, Chen Qimin. Trends of surface dry-wet state of Ganjiahu in Xinjiang based on humid index[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(5): 921-926.]

Spatio-temporal evolution of the extreme dry and wet events in Tianshan Mountains, Xinjiang, China

CAO Lijun[1], SUN Huilan[1,2], LAN Xiaoli[1], ZHANG Lele[1], LU Baobao[1], LIU Tianyi[1]

(1. College of Geography Science and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China;
2. Study Center for Belt Urban Development along Silk Road Economic Belt, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, Xinjiang, China)

Abstract: The FAO Penman-Monteith model was used to calculate the monthly surface humid index at 26 meteorological stations in the Tianshan Mountains, Xinjiang, China, based on their meteorological data from 1960 to 2017. The extreme dry and wet event frequencies were calculated after standardizing the data. Subsequently, the Mann-Kendall trend analysis and inverse distance weighting methods were used to explore their spatio- temporal evolutionary characteristics. Pearson and partial correlation analyses and cross wavelet transform were used to investigate the influence of meteorological factors and atmospheric circulation on the extreme dry and wet events. The results showed that (1) the interannual decrease and increase in extreme dry and wet events were −0.40 and 0.37 times per decade, respectively. The highest occurrence of extreme dry and wet events and the largest decrease in extreme dry events occurred in summer, while the largest increase in extreme wet events was in autumn; (2) the northern slope exhibited the highest incidence of extreme dry and wet events, with a frequency of 4.36 and 2.76 times a year, respectively. It also exhibited the fastest rate of decline in extreme dry and increase in extreme wet events, with an average annual incidence of −0.75 and 0.58 times per decade, respectively; and (3) the average relative humidity was the primary meteorological factor influencing the changes in extreme dry and wet events in the region, and the El Niño-Southern Oscillation was the main atmospheric circulation factor.

Keywords: Tianshan Mountains; extreme drought/wet events; spatio-temporal evolution; humid index; meteorological factors; atmospheric circulation